

COMPARAÇÃO DO POSICIONAMENTO GEODÉSICO TRIDIMENSIONAL REALIZADO COM MODELOS IDÊNTICOS DE ANTENAS E DE RECEPTORES GPS EM DIFERENTES ÉPOCAS E INTERVALOS DO DIA

Maria Lígia Chuerubim, Faculdade de Engenharia Civil/Universidade Federal de Uberlândia - E-mail: marialigia@feciv.ufu.br

Plínia Guedes Gomes, Faculdade de Engenharia Civil/Universidade Federal de Uberlândia - E-mail: plinia_guedes@hotmail.com

Resumo: Este trabalho apresenta os experimentos realizados ao das rodovias federais BR365 e BR497, que cortam o município de Uberlândia – MG, por meio da materialização de cinco marcos geodésicos que foram rastreados em épocas distintas e em diferentes intervalos do dia, utilizando-se os mesmos modelos de antenas e receptores *Global Positioning System* (GPS), aplicando-se o método de posicionamento relativo estático, com durações variando de acordo com o comprimento da linha de base e com as recomendações da Norma Técnica de Georreferenciamento de Imóveis Rurais (NTGIR), e os modelos de calibração relativa e absoluta do centro de fase das antenas dos receptores nas etapas de processamento e ajustamento dos dados GPS. Verificou-se, que de forma geral, que as coordenadas geodésicas estimadas com os parâmetros de calibração relativa e absoluta do centro de fase das antenas dos receptores não apresentaram diferenças significativas para os rastreios realizados para o período matutino, mesmo em diferentes épocas. As coordenadas geodésicas estimadas para o período vespertino apresentaram as piores precisões e as maiores discrepâncias com a aplicação destas correções, identificando-se uma melhora significativa com a aplicação dos parâmetros de calibração absoluta do centro de fase das antenas dos receptores, em especial para a componente altimétrica. Tais resultados estão associados ao intervalo do dia que apresenta as maiores temperaturas e variação da umidade relativa do ar, variáveis associadas diretamente à influência da refração ionosférica e troposférica na estimativa das posições tridimensionais.

Palavras-chave: Posicionamento Geodésico, Receptores GPS, Modelos de calibração relativa e absoluta.

COMPARISON OF THREE-DIMENSIONAL GEODETIC POSITION HELD WITH IDENTICAL ANTENNA AND GPS MODELS RECEIVER IN DIFFERENT TIMES AND RANGES OF THE DAY

Abstract: This work presents the experiments performed to federal highway BR365 and BR497, cutting Uberlândia - MG through the materialization five geodesic marks that were screened at different times and at different intervals of the day, using the same antennas and receivers models *Global positioning System* (GPS), applying the method of static relative positioning, with durations varying according to the length of the baseline and the recommendations of the *Georeferencing of Rural Properties Technical Standard* (NTGIR), and the calibration relative and absolute models of phase center of the antennas of the receivers in processing steps and adjustment of GPS data. It was found that in general, which geodetic coordinates estimated using the calibration parameters relative and absolute of phase center of the receiver antennas showed no significant differences for the screenings done for the morning, even at different times. The geodetic coordinates estimated for the afternoon had the worst accuracies and larger discrepancies with the application of these corrections, identifying a significant improvement with the application of calibration parameters absolute phase center of the receiver antennas, especially for the component altimetry. These results are associated with the break of day that shows the greatest variation of temperature and relative humidity, variables associated directly to the influence of tropospheric and ionospheric refraction in the estimation of three-dimensional positions.

Keywords: Geodetic positioning, GPS Receivers, Models of relative and absolute calibration.

1. INTRODUÇÃO

As tecnologias de posicionamento baseadas em satélites artificiais como o *Global Navigation Satellite System* (GNSS) que compreendem o *Global Positioning System* (GPS), o Galileo, o Glonass e o Compass ou Beidou, vêm substituindo métodos e técnicas tradicionais de levantamento em aplicações que necessitam de alta precisão e acurácia (MONICO, 2008).

Esta transição tem sido impulsionada pela popularização da tecnologia GNSS, que representa uma ferramenta de levantamento eficiente, econômica, que independe de condições climáticas e de intervisibilidade, e apresenta relativa simplicidade operacional com precisões que variam da ordem de centímetros a poucos milímetros (SANTOS e SÁ, 2006).

O posicionamento geodésico pode ser realizado de forma absoluta ou relativa. A qualidade da estimativa das coordenadas tridimensionais dos pontos/localizações é dada em função do tempo de rastreamento e da distância entre as estações base e móvel. Desta forma, quanto maior for o tempo de rastreamento maior será o número de observações, o que resultará em uma melhor exatidão na estimativa de parâmetros geodésicos como coordenadas, velocidades, parâmetros atmosféricos, dentre outros.

Em levantamentos geodésicos que envolvem linhas de bases longas (acima de 100 km) ou redes o método de posicionamento mais indicado é o relativo estático, em virtude do período de ocupação das estações ser relativamente longo (no mínimo 20 minutos a algumas horas). Neste método são utilizadas as duplas diferenças das observáveis GPS como fase da onda portadora e/ou pseudodistância.

Todavia, erros dependentes da geometria do local onde se encontra materializada uma determinada estação não são eliminados no processo das duplas diferenças das observáveis GPS. Por esta razão, as principais fontes de erros envolvidas no posicionamento relativo devem ser investigadas, dentre as quais destacam-se erros associados à propagação do sinal como ionosfera, troposfera, multicaminhamento e ao erro do centro de fase das antenas dos receptores GNSS.

No que concerne ao erro inerente ao centro de fase das antenas dos receptores GNSS, ocorre em razão da não coincidência entre o centro de fase eletrônico, onde o sinal é registrado, com o centro geométrico da antena (HUINCA, 2009), sendo determinado em função do comprimento dos vetores das componentes do deslocamento do centro de fase da antena (PCO – *Phase Center Offset*), pelas variações do centro de fase da antena (PCV – *Phase Center Variation*) e, ainda, pela influência de variáveis ambientais (temperatura, umidade relativa do ar e precipitação) e pelo efeito do multicaminho (HUINCA e KRUEGER, 2012).

O erro associado ao centro de fase das antenas dos receptores GNSS pode acarretar degradações nas precisões das coordenadas altimétricas das estações da ordem de até 10 centímetros nas componentes altimétricas e de até 3 centímetros para as componentes planimétricas das estações (MADER, 1999; SEEBER, 2003). Na prática a modelagem deste erro é feita com base na aplicação de modelos de calibração relativa e absoluta de diferentes modelos de antenas de receptores GNSS disponibilizados pelo National Geodetic Survey (NGS), (KERSTEN e SCHÖN, 2010; MADER, 2001).

Os métodos de calibração são classificados quanto à localidade das medições (laboratório ou campo), quanto ao tipo de sinal utilizado (artificial ou real) e quanto à necessidade da utilização de uma antena de referência, o que determinará se o método será relativo ou absoluto (FREIBERGER JÚNIOR, 2007). Os modelos de calibração relativa dos centros de fase das antenas dos receptores assumem as PCVs da antena de referência como nulas, o que torna inviável a correta determinação do centro de fase da antena no processamento de linhas de bases longas (MENGE et al, 1998). Estes modelos não permitem uma distribuição homogênea das observações em relação ao hemisfério da antena e nem a determinação das PCVs para ângulos inferiores a 10° graus de elevação, como também desconsideram as PCVs para diferentes satélites.

Nas correções relativas observa-se uma linha de base curta (poucos metros) formada por duas estações de referência conhecidas por um longo período de rastreamento. Em uma das extremidades da linha de base tem-se a estação que opera a antena de referência e na outra extremidade a antena a ser calibrada (MENGE et al, 1998; MADER, 1999). Na combinação de soluções do Sistema de Referência Terrestre Internacional (ITRF - International Terrestrial Reference Frame) realizada pelos centros de análises globais como o International GNSS Service (IGS) foram utilizados, inicialmente, os modelos de calibração relativa dos centros de fase das antenas dos receptores.

Todavia, essas correções conduziram a variações bruscas em escala e erros significativos nas coordenadas das estações da rede ITRF, uma vez que estas soluções são obtidas pelo processamento de linhas de bases longas e intercontinentais, constituídas por diferentes modelos de antenas, o que implica que as direções dos sinais coletados simultaneamente sejam diferentes em cada estação e que diferentes PCVs devam ser consideradas (SCHMID et al., 2006).

A incoerência entre as soluções ITRF obtidas com os modelos de calibração relativa ocorria em razão da influência do ângulo de elevação dos satélites ser negligenciada, o que acarretava erros da ordem de 5 milímetros em latitude e longitude e de até 1 centímetro para as altitudes geométricas (SCHMID et al., 2005; ROTACHER, M., 2001). Consequentemente, em processamentos envolvendo linhas de bases longas a aplicação destes modelos se torna inviável, sendo assim, recomenda-se a aplicação dos modelos de calibração absoluta.

O método de calibração absoluta em campo das antenas GNSS método permite a determinação das PCVs em função da elevação e do azimute dos satélites GNSS, com precisão de poucos milímetros; a cobertura homogênea de observações no horizonte da antena; a redução do efeito de multicaminho; a determinação das PCVs para ângulos de até 0° graus de elevação; e a realização de experimentos com antenas em ambientes abertos, o que resulta em valores mais realísticos (IfE, 2012). Além disso apresenta as seguintes vantagens: não necessita de uma antena de referência para realizar o procedimento de calibração; o efeito do multicaminho é eliminado e/ou reduzido; as PCVs referem-se ao Ponto de Referência da Antena (ARP - Antenna Reference Point); a antena apresenta boa cobertura de dados em seu hemisfério, em decorrência dos movimentos de rotação e inclinação aos quais é submetida; e, além disso, é possível realizar medidas variando-se os ângulos de elevação e azimute (MENGE et al, 1998).

Neste contexto, pretende-se com este trabalho comparar e avaliar a aplicação dos modelos de calibração relativa e absoluta dos centros de fase das antenas dos receptores GPS no posicionamento relativo para linhas de bases curtas, utilizando-se diferentes condições de rastreamento e intervalos do dia, adotando-se modelos idênticos de antenas dos receptores.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção é caracterizada a área de estudo, bem como os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

2.1 Área de Trabalho

Para a realização dos experimentos envolvendo linhas de bases curtas (menores que 100 km) adotou-se como estudo de caso as Rodovias Estaduais BR497 e a BR365 (Figura 1). É possível verificar por meio da Figura 1 que foram implantados três marcos ao longo da BR497 (M001, M002 e M003) e da BR365 (M004, M005 e M006). Todavia, o marco M002

foi destruído ao longo do período dos experimentos propostos e por este motivo os experimentos referentes ao mesmo foram descartados deste trabalho.

Os locais para fixação dos marcos ao longo das rodovias foram determinados de acordo com a distância do marco geodésico em relação à estação de referência mais próxima pertencente à RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS). Neste trabalho, adotou-se como estação de referência a MGUB, localizada no Campus Santa Mônica, da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

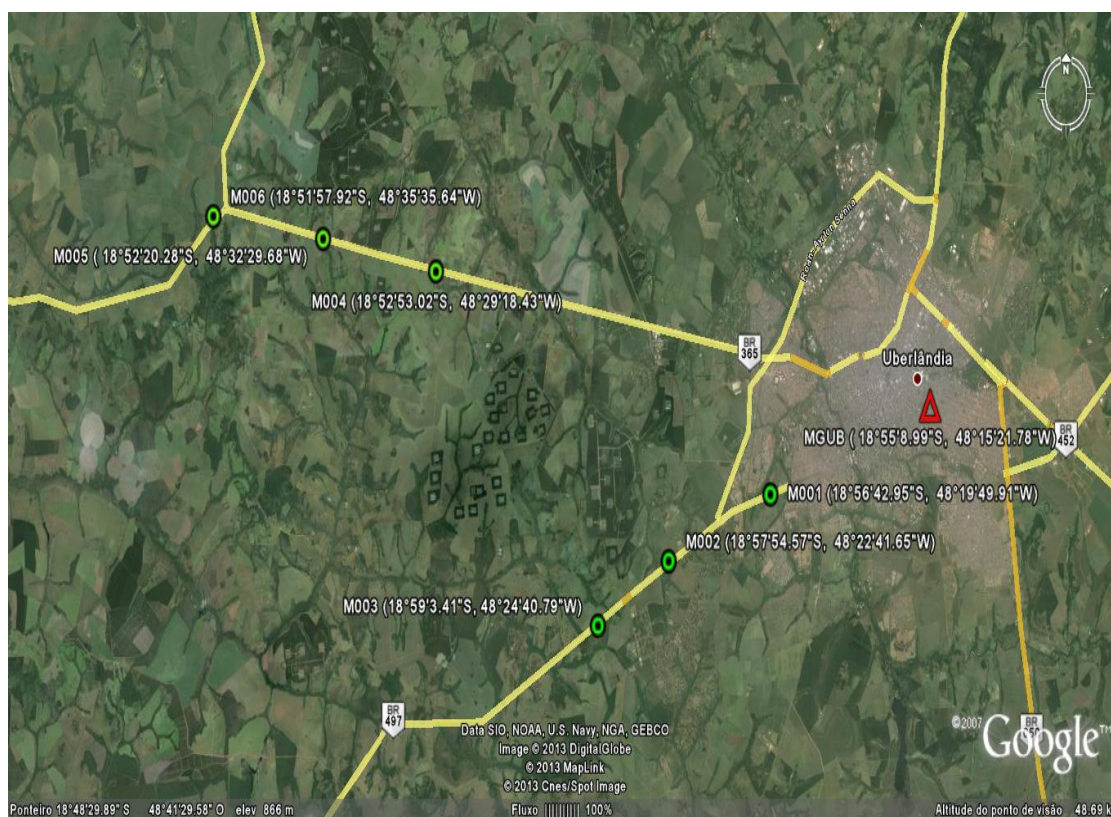


Figura 1 – Localização da estação de referência MGUB e dos marcos geodésicos materializados na BR497 e BR365 (gerar figuras com coordenadas).

Fonte: Google Earth (2013).

A materialização dos marcos ocorreu às margens destas rodovias, utilizando-se corpos de prova em concreto disponibilizados pelo Laboratório de Materiais de Construção Civil da Faculdade de Engenharia Civil (FECIV) da UFU. Para tanto, adotou-se a Norma de Padronização de Marcos recomendada pelo IBGE (IBGE, 2008), optando-se pela materialização dos marcos por meio de corpos de concreto com chapa incrustada em seu topo.

As Figuras 2 a 4 ilustram, os corpos de prova com as chapas metálicas incrustadas e a materialização dos mesmos ao longo das rodovias.



Figura 2 - Corpo de prova de concreto com chapa incrustada.
Fonte: CHUERUBIM et. al. (2013).



Figura 3 - Materialização dos marcos ao longos as rodovias federais.
Fonte: Autores (2013).



Figura 4 - Escavação realizada nos locais seleccionados à implantação dos marcos de concreto.
Fonte: Autores (2013).

2.2 Materiais e Métodos

As condições estabelecidas para a coleta de dados consideraram às recomendações da Norma Técnica de Georreferenciamento de Imóveis Rurais (NTGIR, 2010). Nos casos de posicionamento relativo estático, a NTGIR determina os tempos de rastreamento em função do comprimento da linha de base e da precisão requerida.

Os marcos foram implantados visando à formação de linhas de bases curtas em relação à estação de referência, ou seja, vetores menores que 100 km. A distância dos marcos geodésicos M001 e M003, materializados na BR497, em relação à estação de referência MGUB, localizada no campus Santa Mônica da UFU, é de 2 km e 8 km, aproximadamente, e dos marcos M004, M005 e M006 é de 25 km, 30 km e 36 km, respectivamente.

O rastreamento dos marcos M001 e M003 foi realizado em diferentes épocas e intervalos do dia (período matutino e vespertino), nos dias 02/05/13 (Dia GPS 122), 07/05/13 (Dia GPS 127) e 08/05/13 (Dia GPS 128). Considerando-se os mesmos critérios, o rastreamento dos marcos M004, M005 e M006 foi realizado nos dias 07/06/13 (Dia GPS 158), 08/06/13 (Dia GPS 159) e 09/06/13 (Dia GPS 160).

Neste experimento foram utilizados receptores GPS Promark100 de simples frequência (L1) e com o modelo de antena ASH111660, ambos da marca ASTECH e disponíveis no Laboratório de Topografia da FECIV. Para tanto, utilizou-se o método de posicionamento relativo estático. A antena dos receptores em todos os rastreios foi mantida verticalizada, a uma altura de 2 metros, tomando como referência o norte verdadeiro referente ao modelo de antena dos receptores utilizado no experimento (NGS, 2013), assegurando que as antenas estejam voltadas sempre para a mesma direção, ameniza-se o erro do centro de fase através da diferenciação (IBGE, 2010).

Para verificar os parâmetros específicos de cada modelo de antena dos receptores GNSS, basta consultar o site do NGS no seguinte endereço: <<http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/>> (NGS, 2013).

Foram utilizados, também termômetro e barômetro, com o intuito de se identificar as variações de temperatura e pressão no início e ao final de cada rastreamento, bem como a variação destes parâmetros em função da localização geográfica e geometria do local onde foi materializada a estação.

A Figura 5 ilustra o modelo de antena ASH111660 utilizada no experimento e suas especificações fornecidas pelo NGS (2013).



Figura 5 – Antena ASH111660 (L1).
Fonte: NGS (2013).

A Figura 6 ilustra um dos rastreios realizados em um dos marcos materializados ao longo das rodovias, utilizando-se o receptor Promark100 e o modelo de antena ASH111660.



Figura 6 – Rastreio dos marcos com o GPS Promark100.
Fonte: Autores (2013).

3. EXPERIMENTOS

3.1 Estratégia de rastreio dos marcos

Os marcos geodésicos foram rastreados com modelos de receptores e antenas GPS idênticos, visando identificar as influências do multicaminhamento, da variação da geometria dos satélites e das variáveis ambientais, considerando-se as mesmas condições de rastreio e a influência da localização geográfica para linhas de bases curtas.

Os rastreios dos marcos M001 e M003 iniciaram-se, respectivamente, por volta das 08:00 horas e 10:00 horas da manhã e tiveram a duração de 20 minutos e 1 hora, respectivamente. Enquanto que o rastreio dos marcos M004, M005 e M006 foi realizado com duração de 2 horas, como recomenda a NTGIR (2010).

Os receptores foram configurados com máscaras de elevação de 15° graus, para que desta forma observações oriundas de satélites com ângulos de elevação abaixo da máscara de corte pré-estabelecida fossem descartadas.

Quanto as variáveis ambientais como temperatura, pressão e umidade os valores registrados para os dias de realização dos rastreios pela Estação Meteorológica da UFU são apresentados na Tabela 1:

Tabela 1 - Dados meteorológicos de Uberlândia - MG.

Dia de rastreio	Temperatura do ar			Precipitação (24 horas)	Umidade Relativa (%)			Temperatura Externa	
	09:00 horas	15:00 horas	21:00 horas		09:00 horas	15:00 horas	21:00 horas	Máxima	Mínima
02/05/13	23,4°C	28,4°C	22,8°C	0	64	50	80	29,8° C	18,6° C
07/05/13	21,4°C	26,0°C	18,9°C	0	70	41	71	26,4° C	15,2° C
08/05/13	17,9°C	26,6°C	18,2°C	0	54	41	54	27,2° C	11,4° C
07/06/13	21,8°C	27,2°C	22,2°C	0	78	51	73	-	16,9°C
08/06/13	22,2°C	27,8°C	22,4°C	0	63	42	65	-	16,2°C
09/06/13	22,8°C	26,2°C	22,5°C	0	60	53	41	-	16,5°C

Fonte: IG (2013).

Observa-se, por meio da Tabela 1, que os dados referentes à temperatura máxima externa para os dias 07/06/13, 08/06/13 e 09/06/13 não foram disponibilizados pela Estação Meteorológica da UFU. Para os dias de realização dos experimentos, observa-se que a umidade média do ar foi de 58%, apresentando magnitudes mínimas de 41% e máximas de 70%. Quanto à temperatura externa, os valores mínimos e máximos verificados foram da ordem de 16°C a 28°C, respectivamente.

Os dados meteorológicos registrados nos locais em que foram realizados os experimentos são apresentados na Tabela 2:

Tabela 2 - Dados meteorológicos registrados *in loco*.

Marcos	Dia de rastreio	Intervalo do dia (horas)	Duração (horas)	Precipitação	Temperatura Externa		Pressão (hPa)	
					Inicial	Final	Inicial	Final
M001	02/05/13	08:24-08:45	00:21:15	0	25,0°C	28,5°C	930	932
M001	02/05/13	15:22-15:43	00:20:30	0	36,0°C	34,0°C	931	930
M001	07/05/13	08:20-08:41	00:21:15	0	23,8°C	29,0°C	931	931
M001	08/05/13	07:43-08:05	00:22:00	0	20,0°C	18,0°C	933	933
M003	02/05/13	10:48-11:49	01:00:45	0	40,0°C	44,0°C	932	933
M003	02/05/13	18:01-19:01	01:00:45	0	23,0°C	22,5°C	932	932
M003	07/05/13	10:15-11:16	01:01:00	0	36,9°C	38,0°C	931	931
M003	08/05/13	09:48-10:48	01:00:45	0	22,9°C	28,8°C	933	933
M004	07/06/13	07:26-09:28	02:01:30	0	17,0°C	21,0°C	922	921
M004	08/06/13	13:49-15:50	02:01:45	0	31,0°C	31,0°C	922	921
M004	09/06/13	07:13-09:15	02:01:45	0	19,5°C	25,0°C	924	923
M004	09/06/13	13:41-15:29	01:47:30	0	23,0°C	28,5°C	921	920
M005	07/06/13	09:30-11:32	02:02:45	0	22,0°C	29,0°C	920	920
M005	08/06/13	14:01-16:03	02:02:00	0	30,0°C	26,5°C	920	918
M005	09/06/13	07:24-09:25	02:01:30	0	18,0°C	25,5°C	918	921
M005	09/06/13	13:26-15:27	02:01:15	0	27,5°C	26,0°C	916	918
M006	07/06/13	11:32-13:34	02:01:45	0	25,0°	27,0°C	918	918
M006	08/06/13	16:31-18:32	02:01:15	0	37,0°C	26,0°C	917	917
M006	09/06/13	09:48-11:53	02:04:30	0	25,5°C	30,0°C	919	918
M006	09/06/13	15:46-17:47	02:01:30	0	28,0°C	22,0°C	916	916

Observa-se por meio da Tabela 2 que a temperatura média in loco para os dias referentes à realização dos experimentos foi de 28,8° C, apresentando temperaturas mínimas e máximas de 18°C e 44°C, respectivamente. Quanto a pressão atmosférica os valores médios foram de 925 hPa e magnitudes máximas de 933 hPa e mínimas de 916 hPa. Além disso, verifica-se que para o período analisado não foram registradas precipitações.

3.2 Processamento e ajustamento dos dados

Os dados GPS foram processados e ajustados considerando-se duas estratégias: aplicação dos parâmetros de calibração absoluta e relativa do centro de fase das antenas dos receptores GPS, com diferentes máscaras de elevação 1°, 5°, 10° e 15°, com o objetivo de se analisar o impacto da adoção dos parâmetros de calibração e da variação dos ângulos de corte dos satélites no posicionamento relativo envolvendo linhas de bases curtas.

Para tanto os dados GPS foram convertidos de seu formato nativo para o formato padrão *Receiver Independent Exchange Format* (RINEX) e, posteriormente, processados e ajustados no *software* Topcon Tools, juntamente com os arquivos da estação base (MGUB), disponibilizados gratuitamente, no formato RINEX, no *site* do IBGE no seguinte endereço: <http://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm> (Acesso: maio/2013). O *software* Topcon Tools permite a inserção dos parâmetros rigorosos dos modelos de calibração do centro de fase das antenas para as portadoras L1 e L2 dos receptores GNSS como os valores de PCO e PCV, obtidos junto ao NGS no endereço <<http://geodesy.noaa.gov/ANTCAL/>>, (Acesso: maio/2013), (NGS, 2013).

4. RESULTADOS

Para a análise dos resultados considerou-se os fatores que influenciam as precisões do posicionamento tridimensional com base na observação de satélites artificiais, ou seja, dados relativos ao comprimento da linha de base, diluição de precisões (PDOP - *Dilution of Precision*), dados meteorológicos, tempo de rastreamento, intervalo do dia, máscaras de elevação dos satélites e dos parâmetros de calibração relativa e absoluta do centro de fase das antenas dos receptores GPS.

Para o marco M001 as coordenadas geodésicas estimadas para o período matutino (GPS 122) com a aplicação dos parâmetros de calibração relativa apresentaram precisões da ordem de 0,016 a 0,032 metros para as componentes planimétricas latitude e longitude, respectivamente, e para a componente altimétrica da ordem de 0,043 a 0,089 metros. Com a aplicação dos parâmetros de calibração absoluta as soluções obtidas apresentaram precisões da ordem de 0,017 a 0,030 metros para as componentes planimétricas latitude e longitude, respectivamente, e de 0,043 a 0,075 metros para a altitude geométrica.

Para o período vespertino (GPS122) as precisões obtidas para o marco M001 foram da ordem de 0,018 a 0,023 metros para as componentes planimétricas latitude e longitude, respectivamente, e de 0,045 a 0,054 metros para a componente altimétrica, aplicando-se os parâmetros de calibração relativa. Os resultados obtidos aplicando-se os parâmetros de calibração absoluta resultaram em precisões de 0,019 e de 0,018 metros para a latitude e longitude, respectivamente, e de 0,045 metros em altimetria.

Os resultados obtidos para o marco M001 para o período matutino e vespertino, em uma mesma época (GPS 122), com modelos de receptores e antenas idênticos e aplicando-se os parâmetros de calibração relativa e absoluta do centro de fase da antena dos receptores GPS, podem ser verificados por meio das Figuras 7 e 8:

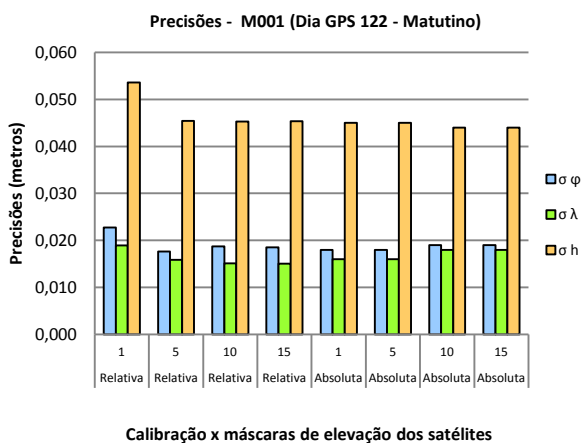


Figura 7 –M001 matutino (GPS 122).

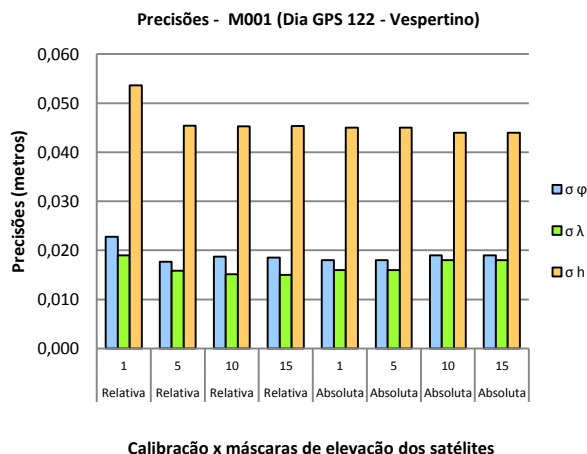


Figura 8 – M001 vespertino (GPS 122).

Verifica-se por meio das Figuras 7 e 8 que as piores precisões foram encontradas para a componente altimétrica, constatação esta que converge com os valores encontrados na literatura (ROTHACHER, 2001). Além disso, verifica-se que os resultados obtidos entre as soluções aplicando-se os parâmetros de calibração relativa e absoluta apresentam discrepâncias milimétricas para a linha de base MGUB-M001 (2 km), entre os dados coletados em uma mesma época (Dia GPS 122) e em diferentes intervalos do dia. De maneira geral, as precisões altimétricas e planimétricas do marco M001 foram degradadas à medida que se diminui a máscara de elevação ou ângulo de corte dos satélites.

Para o rastreamento do marco M001 adotando-se as mesmas estratégias de processamento e ajustamento dos dados, mas considerando-se observações coletados em um mesmo intervalo do dia (período matutino) e em épocas diferentes (dias GPS 127 e 128) foram obtidas as seguintes soluções:

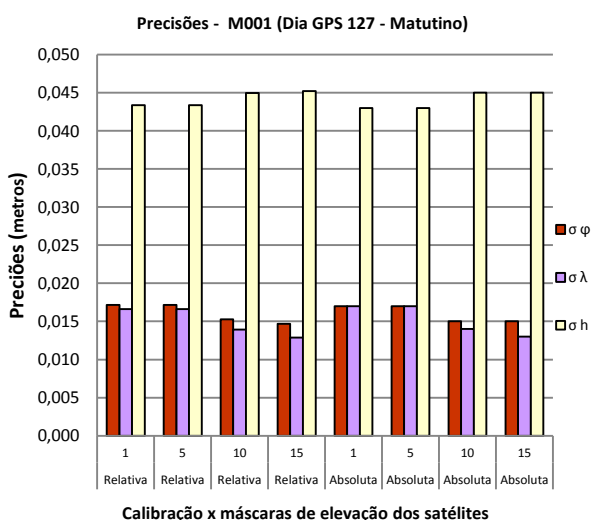


Figura 9 - M001 matutino (GPS 127).

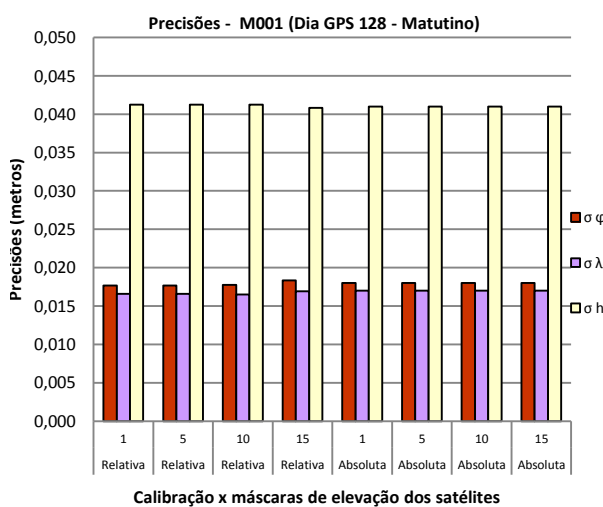


Figura 10 - M001 matutino (GPS 128).

As soluções obtidas com parâmetros relativos para o M001 no dia GPS 127, para o período matutino, atingiram precisões da ordem de 0,015 a 0,017 metros para a latitude, de 0,013 a 0,017 metros para a longitude e de 0,043 a 0,045 em altimetria. As mesmas precisões foram observadas para o marco M001 para o rastreamento realizado no dia GPS 128, aplicando-se os parâmetros de calibração absoluta do centro de fase das antenas dos receptores, como podemos verificar nas Figuras 10 e 11, nas quais se verifica também que para este dia não há uma variação significativa das precisões das coordenadas com a variação da máscara de corte dos satélites.

Para o dia GPS 128 (período matutino), as coordenadas estimadas com os parâmetros de calibração relativa e absoluta para o marco M001 apresentaram precisões de mesma magnitude, atingindo valores da ordem 0,018 metros para a latitude, de 0,017 metros para a longitude e de 0,041 metros para a altitude geométrica.

Para o marco M003 os dados referentes ao rastreamento realizado no dia GPS 122, no período matutino, utilizando parâmetros de calibração relativa e absoluta do centro de fase das antenas dos receptores proporcionaram as mesmas precisões, apresentando os valores de 0,013 metros para a latitude, de 0,012 metros a longitude e de 0,031 metros em altimetria, como ilustra a Figura 11.

Já para o período vespertino o rastreamento realizado no dia GPS 122 para o marco M003 resultou em precisões de 0,014 a 0,015 metros para a latitude, de 0,014 a 0,016 para a longitude e de 0,041 a 0,051 para a altitude geométrica, com os parâmetros de calibração relativa (Figura 12). Com os parâmetros de calibração absoluta, por sua vez, estes valores foram da ordem de 0,015 a 0,018 metros para a latitude, de 0,016 a 0,020 para a longitude e de 0,051 a 0,054 para a altitude (Figura 12).

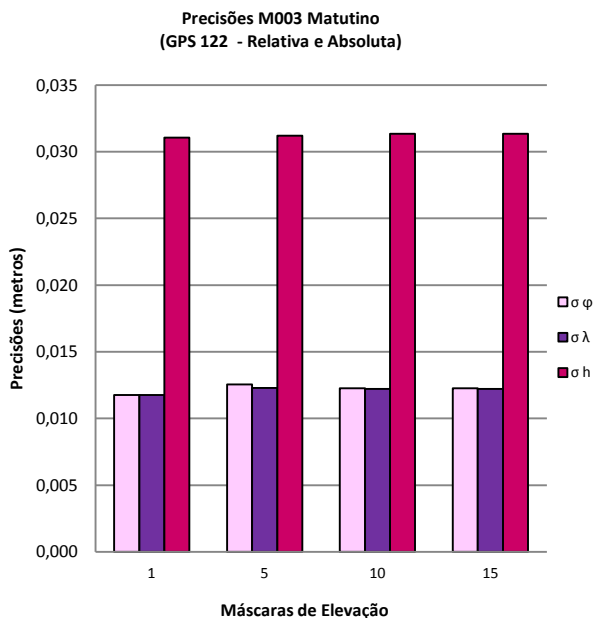


Figura 11 – M003 matutino (GPS 122).

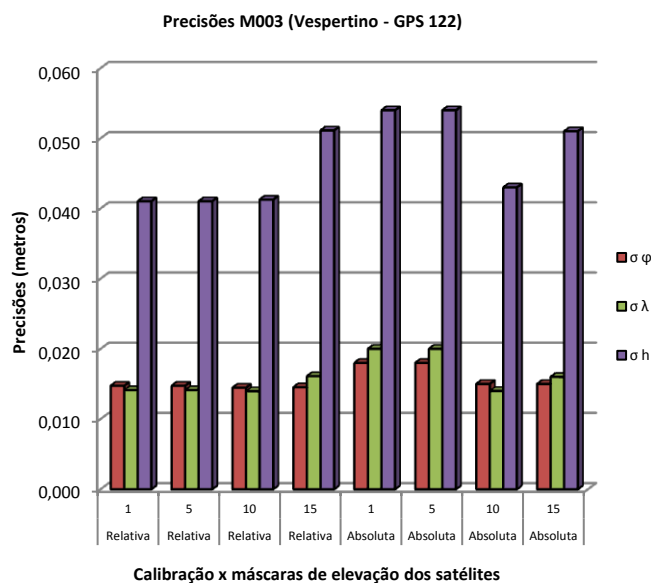
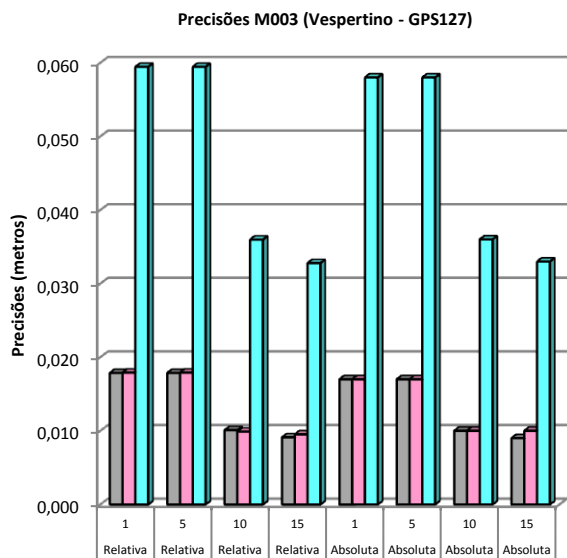


Figura 12 – M003 vespertino (GPS 122).

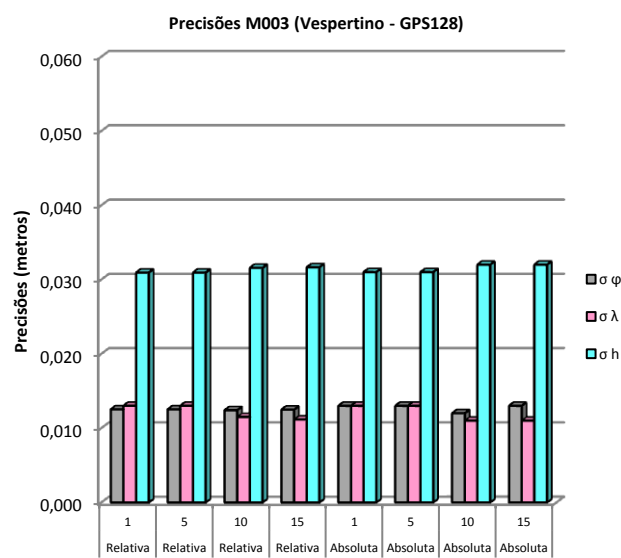
Os resultados obtidos para o marco M003 referentes ao rastreamento realizado no período vespertino no dia GPS 127 aplicando-se os parâmetros de calibração relativa e absoluta do centro de fase das antenas dos receptores GPS resultaram em precisões da ordem de 0,009 a 0,018 metros para a latitude, de 0,010 a 0,018 metros para a longitude e de 0,033 a 0,059 metros para a altitude geométrica (Figura 13).

Para o dia GPS 128 no período vespertino, as precisões obtidas para o rastreamento do marco M003 foi de 0,012 a 0,013 metros para a latitude, de 0,011 a 0,013 metros para a longitude e de 0,031 a 0,032 metros em altimetria, aplicando-se os parâmetros de calibração relativa (Figura 14). As mesmas precisões foram observadas para o rastreamento deste marco com a aplicação dos parâmetros de calibração absoluta do centro de fase das antenas dos receptores GPS (Figura 14).



Calibração x máscaras de elevação dos satélites

Figura 13 - M003 vespertino (GPS 127).



Calibração x máscaras de elevação dos satélites

Figura 14 - M003 vespertino (GPS 128).

Para o marco M004 o rastreamento realizado no dia GPS 158 (matutino) resultou em precisões da ordem de 0,013 a 0,017 metros para a latitude, de 0,014 a 0,021 metros para a longitude e de 0,030 a 0,041 metros em altimetria, aplicando-se os parâmetros de calibração relativa (Figura 15). Para a mesma época e intervalo do dia, porém aplicando-se os parâmetros de calibração absoluta as precisões foram de 0,015 a 0,017 metros em latitude, de 0,016 a 0,022 metros em longitude e de 0,036 a 0,041 metros em altimetria (Figura 15).

Os rastreios realizados no período vespertino para o marco M004 no dia GPS 159 resultaram em precisões que variam de 0,012 a 0,037 metros em latitude, de 0,013 a 0,087 em longitude e de 0,028 a 0,060 em altimetria, com os parâmetros relativos (Figura 16). Com os parâmetros de calibração absoluta do centro de fase das antenas dos receptores, por sua vez, estas precisões variam da ordem de 0,018 metros em latitude, de 0,083 metros em longitude e de 0,049 metros em altimetria (Figura 16).

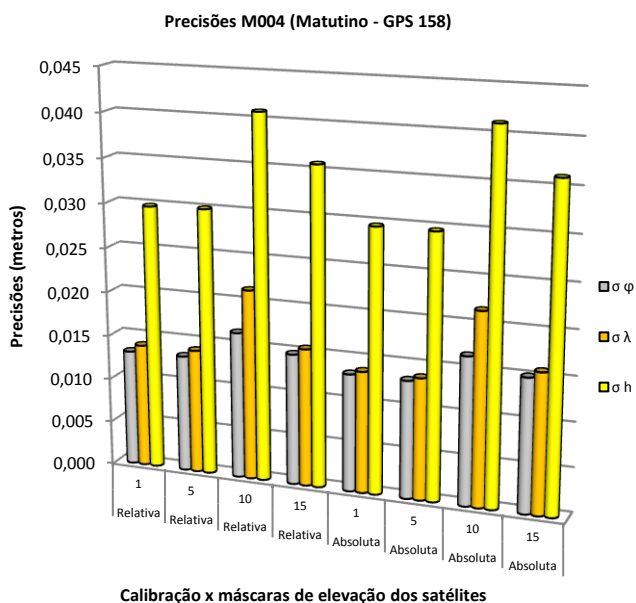


Figura 15 - M004 matutino (GPS 158).

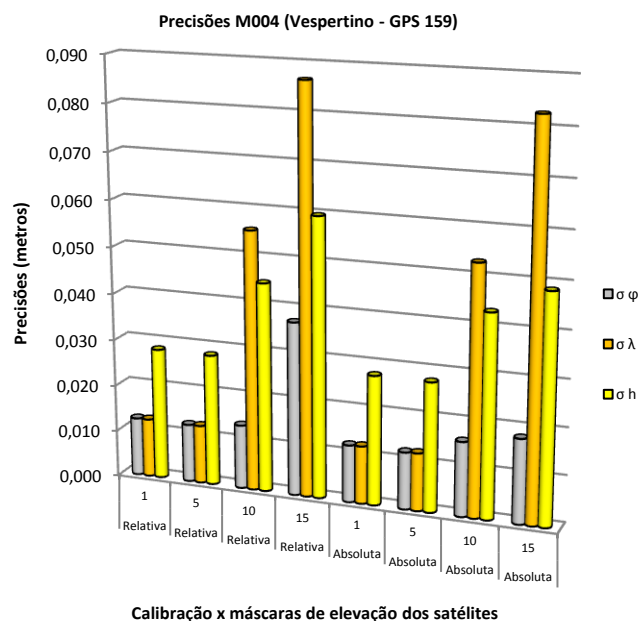


Figura 16 - M004 vespertino (GPS 159).

Para a época G160, no período matutino, as coordenadas estimadas com os parâmetros de calibração relativa e absoluta para o marco M004 foram de 8 mm para a latitude, de 9 mm para a longitude e de 2 cm em altimetria (Figura 17). Para a mesma época porém no período vespertino, os erros obtidos foram da ordem de 0,015 a 0,041 metros para a latitude, de 0,020 a 0,093 para a longitude e de 0,036 a 0,098 em altimetria, aplicando-se os parâmetros de calibração relativa, enquanto que com base na aplicação dos parâmetros de calibração absoluta estes erros foram da ordem de 0,029 metros em latitude, de 0,031 metros em longitude e de 0,081 metros em altimetria (Figura 18).

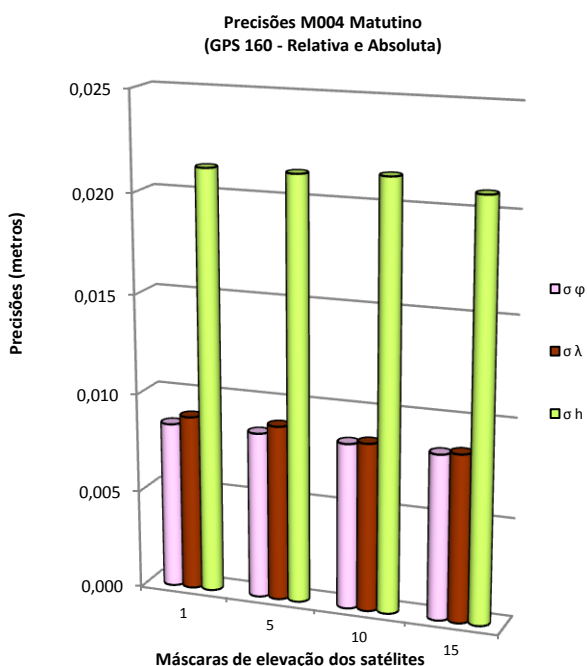


Figura 17 – M004 matutino (GPS 160).

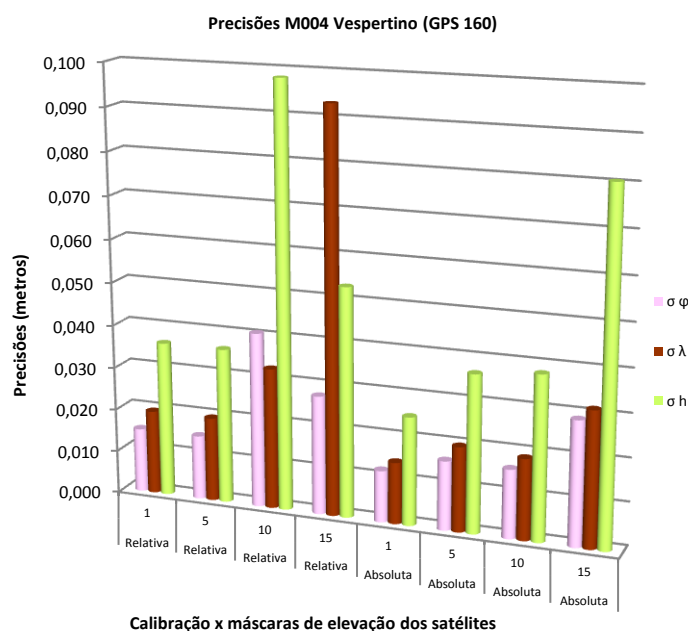


Figura 18 - M004 vespertino (GPS 160).

Para o marco M005 (linha de base de 30 km), o rastreo realizado no período matutino no dia GPS 158 aplicando-se os parâmetros de calibração relativa resultou em precisões de 0,015 a 0,016 metros em latitude, de 0,015 a 0,022 metros em longitude e de 0,036 a 0,041 metros em altimetria (Figura 19). Com a adoção dos parâmetros de calibração absolutos estas precisões foram da ordem de 0,016 a 0,018 metros em latitude, de 0,020 a 0,024 metros em longitude e de 0,045 metros em altimetria (Figura 19).

O rastreo do marco M005 realizado no dia GPS 159, no período vespertino, resultou em precisões da ordem de 0,022 a 0,034 metros em latitude, de 0,085 a 0,095 metros em longitude e de 0,058 a 0,069 metros em altimetria com a aplicação dos parâmetros de calibração relativa. As coordenadas geodésicas deste marco estimadas com os parâmetros de calibração absoluta do centro de fase das antenas dos receptores resultou em precisões da ordem de 0,017 a 0,025 metros em latitude, de 0,076 a 0,097 em longitude e de 0,060 a 0,70 em altimetria (Figura 20).

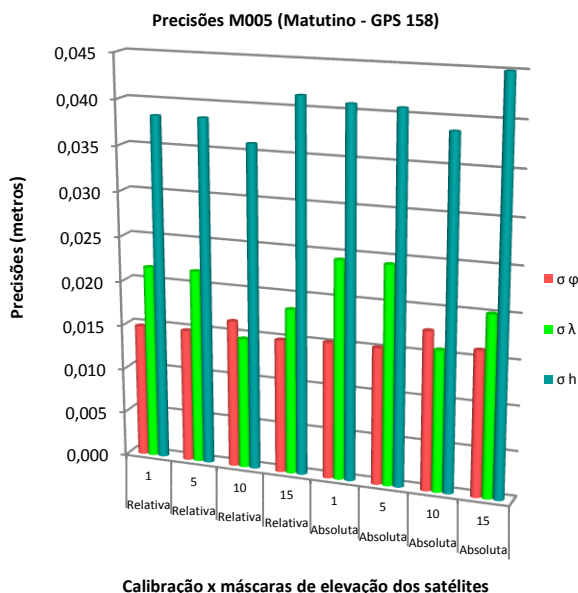


Figura 19 - M005 matutino (GPS 158).

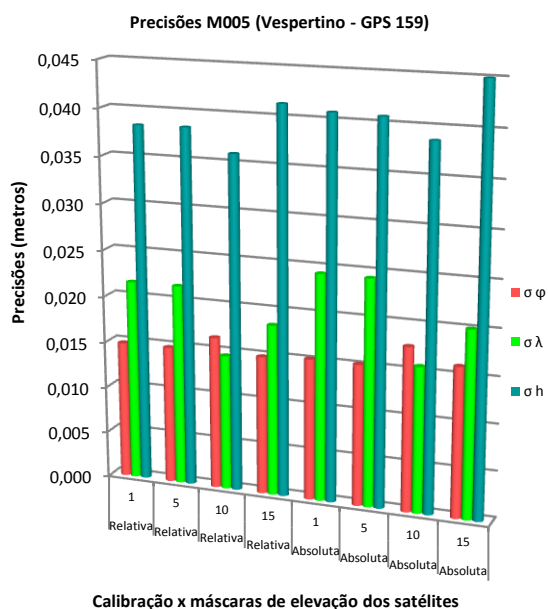


Figura 20 - M005 vespertino (GPS 159).

Para a época G160 o rastreo do marco M005 realizado no período matutino com a aplicação dos parâmetros de calibração relativa e absoluta resultou em erros da ordem de 0,011 metros para as coordenadas planimétricas e de 0,025 metros em altimetria (Figura 21). Para o período vespertino e na mesma época (G160) as coordenadas estimadas com os parâmetros relativos resultaram em erros da ordem de 0,023 a 0,030 metros em latitude, de 0,072 a 0,089 metros em longitude e de 0,062 a 0,097 em altimetria. Com a aplicação dos parâmetros de calibração absoluta do centro de fase das antenas dos receptores estes erros foram da ordem de 0,027 a 0,030 metros em latitude, de 0,079 a 0,086 metros em longitude e de 0,058 a 0,091 metros em altimetria (Figura 22).

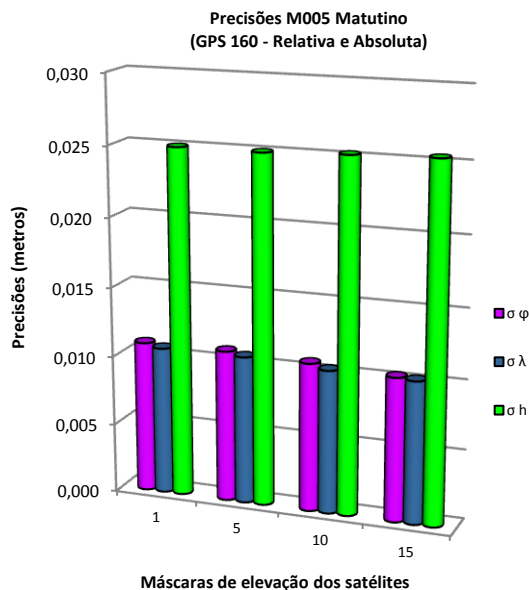


Figura 21 – M005 matutino (GPS 160).

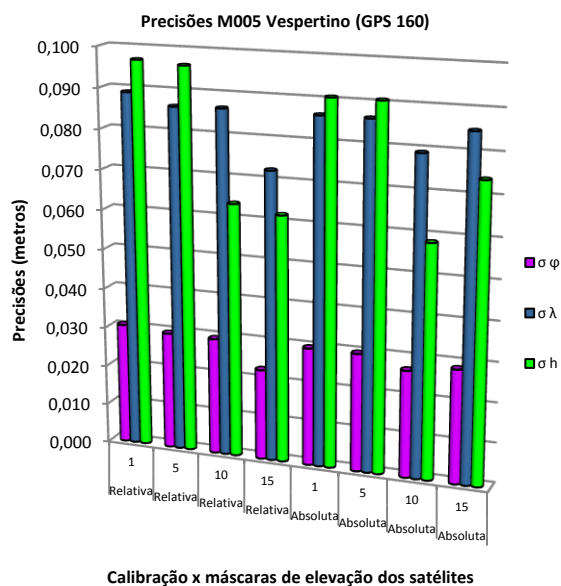


Figura 22 - M005 vespertino (GPS 160).

As coordenadas geodésicas estimadas para o marco M006 com os parâmetros de calibração relativa resultaram em precisões da ordem de 0,015 a 0,018 metros em latitude, de 0,016 a 0,018 metros em longitude e de 0,039 a 0,049 metros em altimetria para o dia GPS 158 no período matutino (Figura 23). Para esta mesma época, as coordenadas estimadas com os parâmetros de calibração absoluta apresentaram precisões em torno de 0,018 metros para as componentes planimétricas (latitude e longitude) e de 0,049 metros em altimetria (Figura 23).

Para o dia GPS 159, período vespertino, as coordenadas do marco M006 estimadas com os parâmetros de calibração relativa resultaram em precisões da ordem de 0,024 a 0,041 metros em latitude, de 0,029 a 0,032 metros em longitude e de 0,064 a 0,092 em altimetria (Figura 24). Para a mesma época, porém considerando-se os parâmetros de calibração absoluta as precisões foram da ordem de 0,032 metros em latitude, de 0,031 metros em

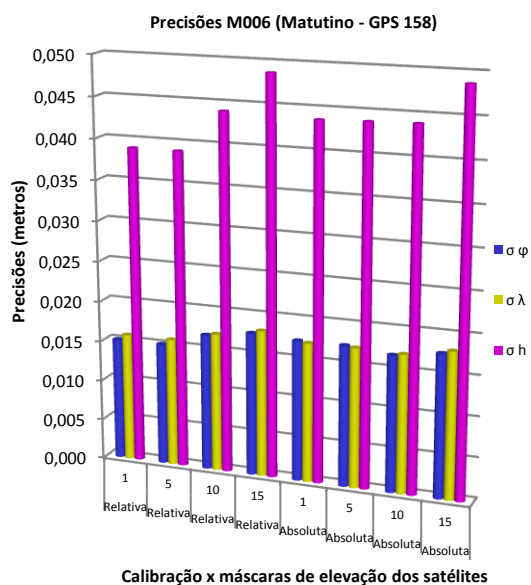


Figura 23 - M006 matutino (GPS 158).

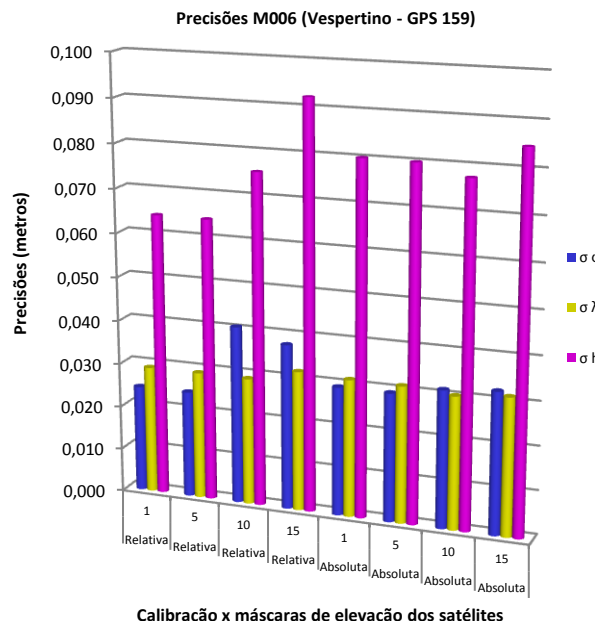


Figura 24 - M006 vespertino (GPS 159).

Para a época G160, as coordenadas estimadas para o marco M006 com a aplicação dos modelos de calibração relativa e absoluta do centro de fase das antenas dos receptores, para o período matutino, apresentaram um erro da ordem de 0,013 metros em latitude, de 0,012 em longitude e de 0,028 metros em altitude (Figura 25).

Para o período vespertino na época G160, aplicando-se os parâmetros de correção relativa os erros em latitude foram de 0,030 a 0,040 metros, em longitude de 0,068 a 0,089 metros e em altimetria de 0,052 a 0,069 metros (Figura 26). Com a aplicação dos parâmetros absolutos para a mesma época e período do dia obteve-se os erros de 0,033 a 0,058 metros em latitude, de 0,074 a 0,129 metros em longitude e de 0,055 a 0,097 metros em altimetria (Figura 26).

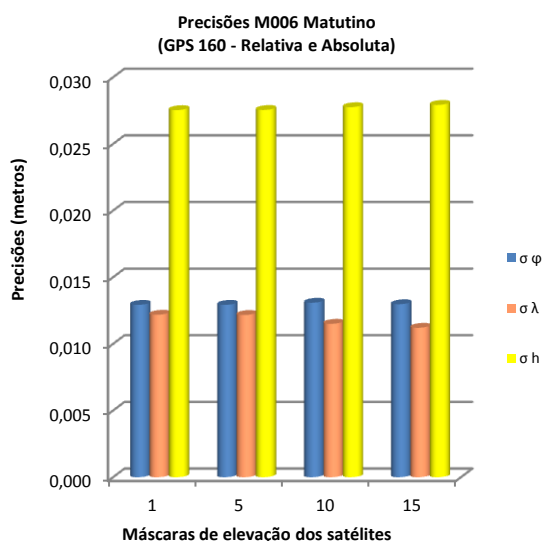


Figura 25 – M006 matutino (GPS 160).

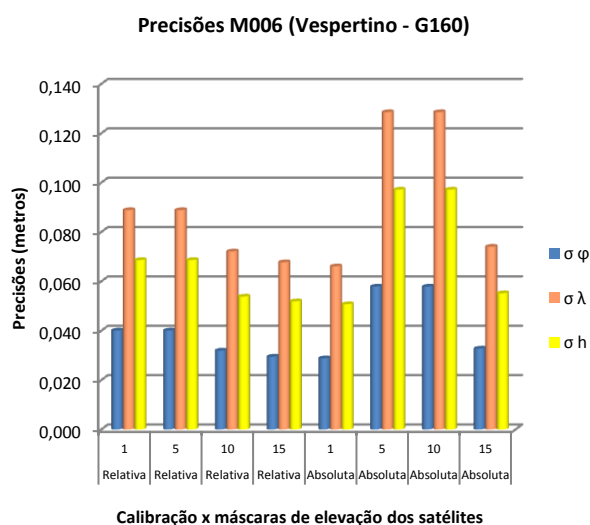


Figura 26 – M006 vespertino (GPS 160).

5. CONCLUSÕES

O desenvolvimento deste experimento contribuiu para analisar o impacto das correções dos parâmetros de calibração relativa e absoluta do centro de fase das antenas dos receptores GPS para linhas de bases curtas, utilizando modelos idênticos de antenas e receptores, no rastreo de marcos geodésicos implantados ao longo das BR365 e BR497.

O rastreo efetuado para o marco M001 que forma uma linha de base de, aproximadamente, 2 km com a estação de referência MGUB da RBMC para uma mesma época (GPS 122) e em um mesmo intervalo do dia (matutino), aplicando-se os modelos de calibração relativa e absoluta do centro de fase das antenas dos receptores, resultaram em erros da ordem de até 3 cm para as componentes planimétricas (latitude e longitude) e de 8 cm para a componente altimétrica. Para o período vespertino e na mesma época (GPS 122) os erros observados foram da ordem de até 2 cm para as componentes planimétricas e de 6 cm em altimetria, aplicando-se os parâmetros de calibração relativa e, aplicando-se os parâmetros de calibração absoluta os erros foram da ordem de 2 cm em planimetria e de até 4 cm em altimetria.

Verifica-se, para o marco M001 que as coordenadas estimadas com os parâmetros de calibração relativa e absoluta para uma mesma época e intervalo do dia (GPS 122) apresenta erros de mesma magnitude. Por se tratar do marco mais próximo da MGUB, verifica-se que as temperaturas observadas *in loco* convergem com os valores fornecidos pela estação

metereológica (Tabela 1) sendo da ordem de 25° C a 28,5°C, com umidade relativa do ar de 64% e variação insignificante da pressão atmosférica durante o rastreo de 930 a 932 hpa.

Para o período vespertino e mesma época (GPS 122) o rastreo do marco M001 apresentou uma melhora significativa em altimetria com a aplicação dos parâmetros de calibração absoluta do centro de fase das antenas dos receptores, reduzindo o erro em 2 centímetros. Nota-se, que durante a coleta destas observações a umidade relativa do ar era de 50%, fator influencia o efeito da refração troposférica comparado ao período matutino do referido dia, mesmo que em menor magnitude. Porém, para este intervalo do dia verifica-se coerentemente temperaturas mais elevadas variando de 36° C a 34°C, enquanto que a pressão atmosférica apresentou assim como no período matutino uma pequena variação de 931 hPa a 930 hpa ao longo do rastreo.

No que se refere à máscara de elevação o rastreo realizado para o marco M001 tanto no período matutino quanto vespertino apresentaram erros estabilizados para máscaras entre 15° a 5°, sendo que as piores precisões foram observadas para às máscaras de elevação de 1°, uma vez que os modelos troposféricos implementados nos *softwares* não estão adaptados para trabalhar com ângulos de cortes pequenos, sendo mais generalistas e apresentando melhores resultados para máscaras entre 10° e 15°.

O rastreo do marco M001 realizado em épocas distintas (GPS 127 e 128) e durante o mesmo intervalo do dia (período matutino), as coordenadas geodésicas estimadas com os parâmetros de calibração relativa e absoluta apresentaram erros de 2 cm em planimetria e de 4 centímetros em altimetria. Verifica-se que estes resultados estão altamente correlacionados com os dados climatológicos que no período da manhã, para as épocas analisadas, apresentaram pequena variação da umidade relativa do ar (de 54% a 70%) e da pressão atmosférica (931 a 933 hPa). Somente em temperatura as variações foram verificadas variações mais discrepantes, mas que porém não influenciaram os resultados obtidos.

Para o marco M003 (linha de base de 8 km) as soluções estimadas com os parâmetros de calibração relativa e absoluta para a época GPS 122 no período matutino, apresentaram erros da ordem de 2 centímetros em planimetria e de 3 cm em altimetria. Para o período vespertino, considerando-se a mesma época (GPS 122), os erros foram da ordem de 2 cm em planimetria e de 5 cm em altimetria. Embora tenha-se verificado uma variação brusca de temperatura para os horários de rastreo e da umidade relativa do ar (50% a 80%), não foram detectadas diferenças significativas para com a aplicação dos parâmetros de calibração relativa e absoluta do centro de fase das antenas dos receptores.

O rastreo do marco M003 no período matutino na época GPS 127 resultou em erros da ordem de 2 cm em planimetria e de 5 cm em altimetria, para as coordenadas estimadas com os modelos de calibração relativa e absoluta. Para a época GPS 128, as coordenadas estimadas com ambos os modelos e no mesmo intervalo do dia (matutino) para o marco M003 resultaram em erros da ordem de 1 cm em planimetria e de 3 cm em altimetria. Os dados climatológicos registrados *in loco* apresentaram para as épocas analisadas o mesmo percentual de umidade relativa do ar (41%) e variação constante de pressão, embora os dados de temperatura tenham sido mais discrepantes.

Verifica-se, poranto, que os piores resultados para a época GPS 122 foram detectados para o período vespertino e para a componente altimétrica, nos rastreios dos marcos M001 e M003 localizados ao longo da BR497.

Para o marco M004 localizado na BR365 e a, aproximadamente, 25 km da MGUB, os erros detectados para o rastreo efetuado no período matutino e na época GPS 158, com os parâmetros de calibração absoluta e relativa, foram da ordem de 2 cm em planimetria e de 4

cm em altimetria. Para o período vespertino e na época GPS 159 resultou em erros da ordem de 4 cm em latitude, de 8 cm em longitude e de 6 cm em altimetria com a aplicação do modelo de calibração relativa. Já, com a aplicação dos modelos de calibração absoluta estes erros foram da ordem de 2 cm para a latitude, de 8 cm para a longitude e de 5 cm em altimetria.

Verifica-se, que na época GPS 159 no período vespertino a aplicação dos parâmetros de calibração absoluta do centro de fase das antenas dos receptores resultou em uma melhora significativa na estimativa da latitude e da altitude geométrica do marco M004, proporcionando respectivamente uma redução do erro de 2 cm e de 1 cm. Este fato deve estar associados às condições atmosféricas observadas durante os rastreios. Para os rastreios do M004 efetuados nas épocas 158 e 159, não apresentaram diferenças significativas em termos de pressão atmosférica e temperatura ao longo do rastreio, porém em termos da umidade relativa do ar a época 158 apresentou um percentual de umidade superior (78%) a época G159 (42%).

As coordenadas geodésicas estimadas para o marco M004 para a época G160, no período matutino, apresentou erros da ordem de 8 mm para a latitude, de 9 mm em longitude e de 2 cm em altimetria, para ambos os modelos do centro de fase. Já para a mesma época porém para o período vespertino, os erros aplicando-se os parâmetros de calibração relativa foram da ordem de 3 cm em latitude, de 9 cm em longitude e de 9 cm em altimetria. Com a aplicação dos parâmetros da calibração absolutos estes erros foram, respectivamente, de 3 cm, 3 cm e 8 cm, ou seja, ocorreu uma redução do erro de 3 cm em longitude e de 1 cm em altimetria com a aplicação destes parâmetros.

Para a época G160 referente ao rastreio do marco M004 verifica-se que as variáveis climatológicas não apresentaram diferenças significativas. Porém, por se tratar de uma linha de base de 25 km verifica-se que a utilização de receptores de simples frequência (L1) para rastreios de 2 horas não fornecem boas precisões. Logo, a alternativa seria aumentar o tempo de rastreio ou utilizar um receptor de dupla frequência visando minimizar principalmente o erro inerente à refração inosférica. Todavia, verifica-se o impacto da correção absoluta do centro de fase das antenas dos receptores GNSS foi relevante para o período vespertino, assim como para os marcos implantados ao longo da BR365.

As coordenadas geodésicas estimadas para o marco M005 na época G158, no período matutino, apresentaram tanto para o modelo de calibração relativa quanto para o modelo de calibração absoluta do centro de fase das antenas dos receptores erros da ordem de 2 cm em planimetria e de 4 centímetros em altimetria. Para a época G159, no período vespertino, estes erros foram da ordem de 2 cm para a latitude, de 9 cm para a longitude e de 6 cm em altimetria, para ambos os modelos. Para as épocas de rastreio G158 e G159 não ocorreram variações bruscas de temperatura e umidade relativa do ar, somente em temperatura, porém justificável pelo horário do rastreio.

Os rastreios do marco M005 realizados na época GPS 160, para o período matutino, resultaram em erros da ordem de 1 cm em planimetria (latitude e longitude) e de 2 cm em altimetria, para as coordenadas estimadas tanto com os parâmetros de calibração relativa quanto com os absolutos. Para o período vespertino na mesma época (GPS 160) os erros em planimetria foram de, aproximadamente, 3 cm em latitude e 8 cm em longitude e em altimetria de 9 cm, para ambos os modelos de calibração.

Analisando-se os parâmetros climatológicos para a época GPS 160 no intervalo de rastreio matutino e vespertino, verifica-se que não ocorreram variações discrepantes e termos de temperatura, pressão e umidade. Logo, a grande influência para este período de rastreio

pode estar associada ao multicaminhamento associado à geometria do local em especial para o período vespertino, em que se observa as maiores temperaturas, e à refração inosférica, uma vez que as observações foram coletadas com receptores de simples frequência para uma linha de base de, aproximadamente, 30 km.

No que concerne ao marco M006, que forma uma linha de base de 36 km com a MGUB, nota-se que o rastreamento realizado no período matutino na época GPS 158, resultou em erros da ordem de 2 cm em planimetria e de 4 cm em altimetria, para ambos os modelos de calibração. Para a época GPS 159, no período vespertino, os erros detectados com a aplicação destes modelos foi a ordem de 3 cm para as componentes planimétricas e de 8 cm em altimetria.

Ao analisarmos as condições atmosféricas para a época do rastreamento GPS 158 e GP159, verifica-se que na época GPS 159 ocorreu uma variação brusca da temperatura que associada ao maior percentual de umidade relativa do ar, podem ter culminado em uma maior interferência da refração troposférica na estimativa das coordenadas tridimensionais do marco.

Para a época GPS 160, no período matutino, as coordenadas estimadas para o marco M006 com ambos os modelos resultou em erros da ordem de 1 cm em planimetria e de 3 cm em altimetria. Já para o período vespertino, as coordenadas estimadas com os parâmetros de calibração relativa apresentaram erros da ordem de 4 cm para a latitude, de 8 cm em longitude e de 6 cm em altimetria. E, com a aplicação dos parâmetros absolutos, estes erros foram da ordem de 6 cm em latitude de 13 cm em longitude e de 10 cm em altimetria.

Em termos das condições atmosféricas para a época GPS 160 para os intervalos de rastreamento do marco M006 não são identificadas diferenças discrepantes entre os parâmetros atmosféricos. Todavia, por se tratar do marco mais distante da MGUB os resultados culminam na necessidade de se utilizar instrumentos *in loco* para medir a umidade relativa do ar no local onde encontra-se materializada a estação, uma vez que quanto mais distante mais generalista se tornam os valores fornecidos pela estação meteorológica que na prática não devem ser descartados, mas sim usados como parâmetros de comparação em relação às variáveis coletadas *in loco*.

AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem à Faculdade de Engenharia Civil (FECIV) da Universidade Federal de Uberlândia (FUF) pelo apoio e, principalmente, a disponibilidade dos equipamentos e materiais necessários para o desenvolvimento da pesquisa durante os trabalhos de campo. E, principalmente, às agências de fomento PIBIC/FAPEMIG/UFU pela aprovação e apoio desta pesquisa por meio de bolsas de iniciação científica.

REFERÊNCIAS

AUTORES. *Imagens do rastreamento do projeto de pesquisa “Comparação dos modelos de calibração relativa e absoluta dos centros de fase das antenas dos receptores GNSS no posicionamento relativo para linhas de bases curtas e longas”.* Uberlândia: UFU/FECIV, 2013.

CHUERUBIM, M. L.; GOMES, P.; PIRES, A.; SILVA, L. A.; MATOS, S. C. *Diagnóstico preliminar da Rede GNSS local da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), campus Santa Mônica: realidade atual e perspectivas futuras no contexto das ciências*

geodésicas. In: XVI SBSR – Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. 13 a 18 de abril de 2013. Foz do Iguaçu-PR.

Estação Meteorológica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). *Dados climatológicos da estação de Uberlândia referentes ao mês de maio de 2013*. Instituto de Geografia (IG). 2013. UFU: IG, 2013.

FREIBERGER JUNIOR, J. *Investigações para a calibração relativa de antenas de receptores GNSS*. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2007.

Google Earth. 2013. *Imagem do município de Uberlândia – MG dos trechos das BR497 e BR365*.

HUINCA, S. C. M. *Calibração relativa de antenas na BCAL/UFPR*. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2009.

HUINCA, S. C. M.; KRUEGER, C. P. *Investigações preliminares das variáveis atmosféricas que podem influenciar na determinação dos parâmetros de calibração de uma antena GPS*. In: IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife-PE, 06-09 de maio de 2012. P. 001-009.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). *Padronização de marcos geodésicos. Diretoria de Geociências (DGC) e Coordenação de Geodésia (CGED)*. Rio de Janeiro: IBGE, 2008.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). *Orientações para instalações de estações de monitoramento contínuo GNSS compatíveis com a RBMC. Manuais técnicos em geociências, número 10*. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

Institut für Erdmessung (IfE). *PCV Calibration of GNSS Antennas*. 2012. Disponível em <http://www.ife.uni-hannover.de/gnss-antenna-calibration.html?&L=1>. Acesso em 28/10/2012.

KERSTEN, T.; SCHÖN, S. *Towards Modelling Phase Center Variations for Multi-Frequency and Multi-GNSS*. In 5th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing, 2010.

MADER, G. *GPS Antenna Calibration at the National Geodetic Survey*. *GPS Solutions*, Vol. 3., N°1, p.50-58, 1999.

MADER, G. L. *A comparison of absolute and relative GPS antenna calibrations*. *GPS Solutions*. John Wiley. v. 4, n. 4, p. 37-40. 2001.

MENGE, F.; SEEGER, G.; VÖLKSEN, C. WÜBBENA, G.; SCHMITZ, M. (1998). *Results of absolute field calibration of GPS antenna PCV*. In: Proceedings of the 11th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation ION GPS-98, September 15-18, Nashville, Tennessee.

MONICO, J. F. G. *Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações*. 2ª Ed., São Paulo: UNESP, 2008. 476p.

NGS. National Geodetic Survey. Antenna Calibrations. Disponível em <http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/>. Acesso em 28/10/2012.

NTGIR. Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA). *Norma técnica para georreferenciamento de imóveis rurais.* 2ª edição. Fevereiro, 2010.

ROTACHER, M. *Comparasion of absolute and relative antenna phase center variations.* *GPS Solutions*, Vol. 4., N°4, p.55-60, 2001.

SANTOS, M. S. T.; SÁ, N. C. DE. *O uso do GPS em levantamentos geofísicos terrestres.* *Revista Brasileira de Geofísica*, v.224, n.1, p.63-80, 2006.

SEEBER, G. *Satellite Geodesy: Foundations, Methods and Applications.* Berlin: Walter de Gruyter, 589 p., 2003.

SCHMID, R.; ROTHACHER, M.; THALLER, D.; STEINGENBERGER, P. *Absolute phase center corrections of satellite and receiver antennas. Impact on GPS solutions and estimation of azimuthal phase center variations of the satellite antenna.* *GPS Solutions*, Vol. 9., N°4, p.283-293, 2005.

SCHMID, R.; STEINGENBERGER, P.; ROTACHER, M.; GENDT, G.; GE, M.; TESMER, V. *Absolute antenna phase center corrections and their impact on GPS results.* *Geophysical Research Abstracts*, v. 8, p. 37-84, 2006.